

# Dynamik schlanker Bauwerke im Wind

Peil, Udo

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 2003 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.64-67



J. Cramer Verlag, Braunschweig

UDO PEIL, Braunschweig

## Dynamik schlanker Bauwerke im Wind

Braunschweig, 07.03.2003\*

### 1. Einleitung

Schlanke, hohe Bauwerke, wie Maste, Türme, Windkraftanlagen, Hochhäuser etc. werden im wesentlichen durch den Wind beansprucht. Je nach Art und Querschnitt des Bauwerkes werden dabei unterschiedliche Schwingungsmechanismen angeregt. Im Folgenden werden die wichtigsten Mechanismen kurz dargestellt und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung erläutert. Bild 1 gibt einen Überblick über die bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten auftretenden Schwingungserscheinungen.

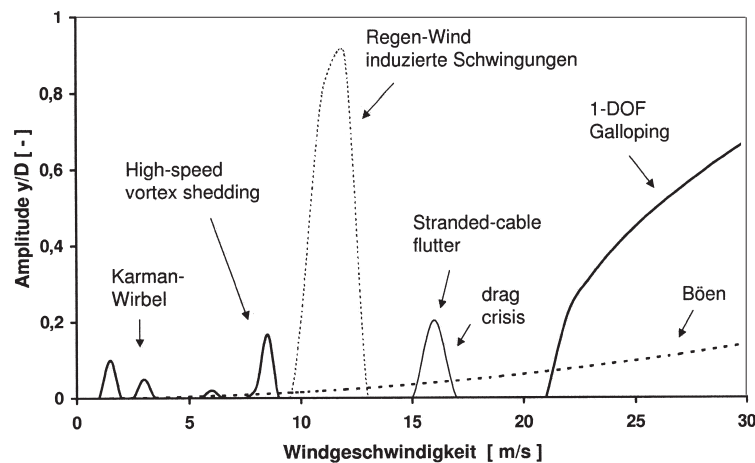


Bild 1: Übersicht über Windschwingungsphänomene

### 2. Böenerregung

Der turbulente (böige) Wind ist regellos, er ist ein stochastischer Prozess. Der fluktuierende Anteil eines solchen Prozesses lässt sich in Abhängigkeit von der Frequenz durch Leistungsspektren beschreiben.

\* Kurzfassung eines Vortrags gehalten in der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

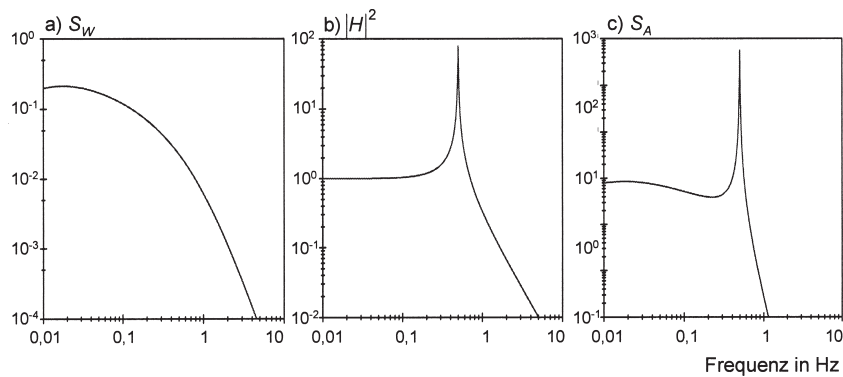


Bild 2: Böenerregte Antworten eines Einmassenschwingers nach der Spektraltheorie

- a) Spektrum der böigen Windkraft  $S_W$
- b) Mechanische Übertragungsfunktion  $|H|^2$
- c) Spektrum der Systemantwort  $S_A$

Bild 2a zeigt ein solches Leistungsspektrum der Windkraft. Für die Resonanzantwort eines Tragwerks bzw. der hier betrachteten Seile ist vornehmlich der Bereich zwischen ca. 0,05 und 2 Hz entscheidend. Für größere Frequenzen nimmt die Energie des böigen Windes rapide ab (man beachte die doppeltlogarithmische Darstellung in Bild 2). Betrachtet werde ein Einfreiheitsgradschwinger mit einer Frequenz von 0,5 Hz. Sein Verhalten wird durch die sog. mechanische Übertragungsfunktion in Bild 2b beschrieben. Mit Hilfe des Spektralverfahrens ergibt sich das Leistungsspektrum der Systemantwort. Man erkennt, dass im Bereich der Resonanzspitze auch kleine Varianzen der Windkraft zu großen Antworten führen. Für Frequenzen größer als ca. 5 Hz ist die Energie der Windkraft allerdings derart klein (Faktor 1/1000 gegenüber dem Frequenzbereich bei etwa 0,1 Hz), dass die dynamische Überhöhung hier selbst bei schwach gedämpften Systemen nicht mehr durchschlägt.

Entsprechende Untersuchungen wurden und werden mit Hilfe von Naturmessungen an einer großen Wind- und Antwortmessanlage am 344m Mast Gartow der Telekom vom Verfasser durchgeführt.

Bei Böenerregung besteht in der Regel keine Ermüdungsgefährdung des Bauwerkes, wenn ungünstige Kerbfälle vermieden werden. Im Eurocode 3-7-1, (Maste und Türme) Abs. 9.2 ist eine vom Verfasser erarbeitete Regel verankert, dass bei Vorliegen einer günstigeren Kerbdetailgruppe als 71 N/mm<sup>2</sup> (Doppelspannungsamplitude) bei reiner Böenbeanspruchung in Hauptwindrichtung die Lebensdauer eines Tragwerks größer als 50 Jahre angenommen werden kann.

### 3. Wirbelerregte Querschwingungen

Bei kreisförmigen Querschnitten, also auch bei Seilen, lösen sich durch das lokale Abbremsen des Luftstromes im rauen Oberflächenbereich von den gegenüberliegenden Seiten

rhythmisch Wirbel ab, es bilden sich sog. Wirbelstraßen (Bild 3). Die Ablösung erfolgt walzenartig über längere Seilbereiche. Die ursprünglich symmetrische Umströmung wird durch die Wirbelablösung gestört; es entstehen nahezu harmonisch wirkende, resultierende Quertriebskräfte. Durch die Wirbelablösung wird die symmetrische Druckverteilung gestört, es entstehen resultierende, relativ kleine Quertriebskräfte. Wenn diese in Resonanz mit dem Tragwerk sind, können große Schwingungsamplituden entstehen [1,2,3]. Bei größeren Schwingungsamplituden setzt ein Selbststeuerungseffekt ein.

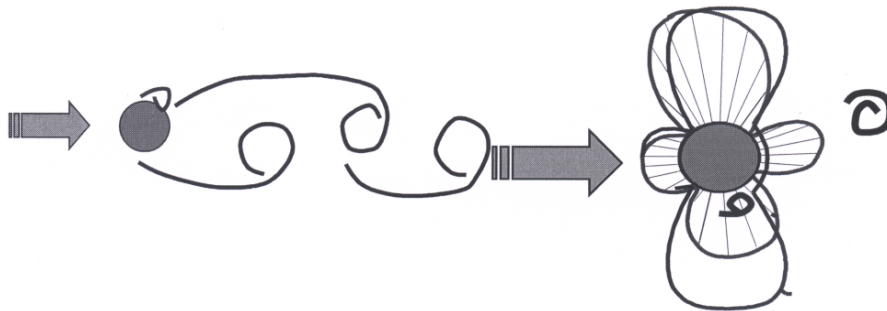


Bild 3: Wirbelablösung

Bild 4: Druckverteilung bei Wirbelablösung

Seilabgespannte Bauwerke bzw. die Seile selbst zeigen ein wesentlich günstigeres Verhalten als beispielsweise frei auskragende Konstruktionen. Dieses gilt insbesondere, wenn sie nur gering vorgespannt sind, so dass nennenswerte Seildurchhänge vorhanden sind. Die Ursache liegt in der sich während der Schwingung ständig ändernden Steifigkeit der Abspannung: Das Tragwerk „verstimmt“ sich kontinuierlich in Bezug auf die Erregerfrequenz, es handelt sich um eine nichtlineare Schwingung. Dies führt zu einer wesentlich erhöhten äquivalenten Strukturdämpfung.

#### 4. Galloping-Schwingungen

Ebenso wie wirbelerregte Schwingungen sind auch Galloping-Schwingungen quer zur Hauptwindrichtung gerichtet. Sie sind zuerst an vereisten Freileitungsseilen beobachtet worden. Es sind Schwingungen geringer Frequenz aber großer Amplitude. Die Seile scheinen zu gallopiert, daher der Name. Da erst eine Querbewegung des Körpers Galloping-Schwingungen initiiert, spricht man von einer selbsterregten Schwingung. Insbesondere sehr schlanke und nur schwach eigengedämpfte Strukturen sind bei Vorliegen einer aeroelastisch-instabilen Querschnittsform anfällig gegenüber Galloping [1,2]. Im Klassenvortrag wurden die Ursachen und entsprechende Gegenmaßnahmen vorgestellt und diskutiert.

#### 5. Regen-Wind-induzierte Schwingungen

Einen auf den ersten Blick mit den Galloping-Schwingungen verwandten Erregermechanismus weisen die sog. Regen-Wind-induzierten Schwingungen auf, die bei schlan-

ken Brückenhängern oder bei Seilen beobachtet wurden. Bei gleichzeitigem Auftreten von Regen und Wind können am schrägen Seil Rinnsale herablaufen. Diese Rinnsale stören die Umströmung des Seilquerschnittes, es entstehen Auftriebskräfte, die zu einer Seilbewegung führen. Die Seilbewegung verändert durch die wirkenden Luft-, Massen-, Dämpfungs- und Schwerkkräfte die Lage des Rinnsals [5]. Damit verändern sich wiederum die einwirkenden Luftkräfte. Da die Schwingungen in einer der Eigenfrequenzen des Seils stattfinden, werden auch die Bewegungen der Rinnsale und damit die anregenden Kräfte im Takt der Eigenfrequenz gesteuert. Dies kann zu einer Anregungsverstärkung führen (negative Dämpfung). Nach einiger Zeit wird ein dynamisches Gleichgewicht erreicht, wenn die infolge innerer und aerodynamischer Dämpfung dissipierte Energie gleich der durch die Strömung zugeführten Energie ist.

Regen-Wind induzierte Schwingungen treten nur bei Regen und in einem begrenzten Bereich relativ kleiner Windgeschwindigkeiten auf. Stets ist das Seil oder der Rundstab gegen die Vertikale geneigt. Es wurden Schwingungen sowohl bei Nieselregen als auch bei starkem Regen beobachtet. Die auftretenden Schwingungsamplituden können ein Vielfaches des Seildurchmessers betragen. Die Anfachung ist unabhängig von der Eigenfrequenz.

### Literatur

- [1] PETERSEN, CHR. (1996), "Dynamik der Baukonstruktionen", Verlag Vieweg, Braunschweig / Wiesbaden.
- [2] PEIL, U. (1994), "Baudynamik" in Stahlbau Handbuch, Band 1 Teil A, Stahlbauverlagsgesellschaft mbH, Düsseldorf.
- [3] RUSCHEWEYH, H. (1986), "Ein verfeinertes, praxisnahes Berechnungsverfahren wirbel-erregter Schwingungen von schlanken Baukonstruktionen im Wind." In: Beiträge zur Anwendung der Aeroelastik im Bauwesen, TU München, 1-27.
- [4] VERWIEBE, C. (1995), "Neue Erkenntnisse über die Erregermechanismen Regen-Wind-induzierter Schwingungen", Stahlbau 65, 547-550.
- [5] PEIL, U., M. BEHRENS & N. NAHRATH, Dynamic response of high and slender structures under wind load. In: H. Grundmann & G. Schuëller (Hrsg.), Proc. of the 5<sup>th</sup> Europ. Conf. on Structural Dynamics: Eurodyn 2002; Munich, Germany, 2-5 September 2002. Rotterdam: Balkema.

---

Prof. Dr.-Ing. Udo Peil  
Försterkamp 9  
D-38302 Wolfenbüttel